

**Iveta SKOTNICOVÁ<sup>1</sup>, Zdeněk GALDA<sup>2</sup>, Petra TYMOVÁ<sup>3</sup>, Marcela ČERNÍKOVÁ<sup>4</sup>,  
Zdeněk JARON<sup>5</sup>**

**VLIV MATERIÁLOVÉ SKLADBY NA DYNAMICKÉ TEPELNÉ CHOVÁNÍ  
STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ V LETNÍM OBDOBÍ**

**EFFECT OF MATERIAL COMPOSITION ON DYNAMIC THERMAL PERFORMANCE  
OF BUILDING STRUCTURES DURING THE SUMMER**

**Abstrakt**

Příspěvek se zabývá vlivem materiálové skladby na dynamické tepelné chování homogenní stěny. Pro simulační výpočet časového průběhu teplot uvnitř konstrukce za nestacionárních podmínek je použit software CalA. Na praktickém příkladu obvodového pláště dřevostavby jsou porovnány výsledky simulačního výpočtu průběhu teplot uvnitř konstrukce s výsledky experimentálního měření v letním období.

**Klíčová slova**

Tepelná zátěž vnitřního prostředí, dynamická tepelná odezva stavební konstrukce.

**Abstract**

This paper deals with the influence of material composition on the dynamic thermal behavior of homogeneous walls. For simulation calculation of temperature inside the structure is used software CalA. It exemplifies wooden cladding are compared to the results of simulation calculation of the temperature inside the structure with the results of experimental measurements in the summer.

**Keywords**

Heat load of internal environment, dynamic thermal response of structures.

---

<sup>1</sup> Ing. Iveta Skotnicová, Ph.D., Katedra prostředí staveb a TZB, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 957, e-mail: iveta.skotnicová@vsb.cz.

<sup>2</sup> Ing. Zdeněk Galda, Ph.D., Katedra prostředí staveb a TZB, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 907, e-mail: zdenek.galda@vsb.cz.

<sup>3</sup> Ing. Petra Tymová, Ph.D., Katedra prostředí staveb a TZB, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 352, e-mail: petra.tymova@vsb.cz

<sup>4</sup> Ing. Marcela Černíková, Katedra prostředí staveb a TZB, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 975, e-mail: marcela.cernikova@vsb.cz

<sup>5</sup> Ing. Zdeněk Jaroň, Katedra prostředí staveb a TZB, Fakulta stavební, VŠB-Technická univerzita Ostrava, Ludvíka Podéště 1875/17, 708 33 Ostrava-Poruba, tel.: (+420) 597 321 909, e-mail: zdenek.jaron@vsb.cz

## 1 ÚVOD

Tepelný komfort a úspora energie patří mezi hlavní parametry prostředí budov. Současný trend výstavby dřevostaveb v pasivním standardu přináší problémy s optimálním řešením tepelné zátěže vnitřního prostředí v letním období [1]. Volba vhodné materiálové skladby obvodových konstrukcí může přispět k eliminaci tepelné zátěže vnitřního prostředí [2, 3, 4, 5]. Dynamické tepelné chování stavební konstrukce ovlivňuje řada faktorů, které lze namodelovat pomocí simulačních výpočtových metod nebo ověřit na základě experimentálních měření [6]. Příspěvek se zaměřuje na porovnání některých stavebních materiálů z hlediska jejich tepelného chování a dále porovnává výsledky dynamického simulačního výpočtu tepelné zátěže obvodové stěny dřevostavby s experimentálně naměřenými hodnotami časového průběhu teplot v dané konstrukci v letním období.

## 2 TEORETICKÝ ZÁKLAD VÝPOČTŮ PŘENOSU TEPLA

Dynamické tepelné simulační výpočty popisují chování konstrukce v okamžiku, kdy ještě nebylo dosaženo rovnovážného stavu. Jedná se o děje, při kterých se v průběhu času mění hodnota počítané veličiny (např. teploty). Tento děj se nazývá nestacionární vedení tepla, při kterém je teplota funkcí času  $\theta = f(x, y, z, t)$ .

Pro homogenní a izotropní tělesa za podmínky, že součinitel tepelné vodivosti nezávisí na teplotě a směru šíření tepla a pro tělesa bez vnitřních zdrojů tepla, platí Fourierova parciální diferenciální rovnice vedení tepla [7], která má pro dvourozměrné šíření tepla tvar:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

kde:

$\theta$  je teplota v konstrukci [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$t$  – čas [s],

$a$  – součinitel teplotní vodivosti [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],

$x, y$  – prostorové souřadnice [m].

Teplota v konstrukci je považována za závislou proměnnou veličinu  $\theta = \theta(x, t)$ , čas  $t$  a prostorové souřadnice  $x, y$  jsou nezávislé proměnné, součinitel teplotní vodivosti  $a$  je konstantní veličina popisující materiálové charakteristiky:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (2)$$

kde:

$\lambda$  je součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ ],

$\rho$  – objemová hmotnost [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$c$  – měrná tepelná kapacita [ $\text{J}/(\text{kg K})$ ].

Součinitel teplotní vodivosti vyjadřuje schopnost látky změnit teplotu v určitém místě uvnitř materiálu vzhledem ke změně teploty na povrchu materiálu. Součinitel teplotní vodivosti vyjadřuje rychlost vyrovnávání teplot v materiálu, čím je jeho hodnota vyšší, tím rychleji se mění teplota uvnitř materiálu vzhledem ke změně teploty na povrchu materiálu.

### 2.1 Vliv materiálových charakteristik na teplotní vodivost materiálu

Pro vyjádření závislosti změny teploty uvnitř materiálu v čase, byl proveden srovnávací simulační výpočet pro vybrané stavební materiály. Byla posuzována homogenní stěna tloušťky  $d = 0,30$  m ve čtyřech různých materiálových variantách. Počáteční okrajová podmínka výpočtu byla zvolena:  $\theta(x, 0) = \text{konst.} = 0$   $^{\circ}\text{C}$ . V čase  $t = 0$  h byla skokově zvýšena povrchová teplota konstrukce na teplotu  $\theta = 20$   $^{\circ}\text{C}$  a udržovala se po dobu 24 hodin konstantní. Okrajová podmínka výpočtu byla stanovena:  $\theta(0, t) = \theta(d, t) = \text{konst.} = 20$   $^{\circ}\text{C}$ .

Pro simulační výpočet byl použit software CalA [8, 9], který umožňuje řešit časově ustálené i neustálené 2D sdílení tepla vedením dle rovnice (1). Výpočet je prováděn na ortogonální výpočetní síti metodou kontrolních objemů. Software využívá Newtonovy okrajové podmínky 3. druhu dle [8], která zvolením vysoké hodnoty součinitele přestupu tepla může nabýt charakteru okrajové podmínky 1. druhu – Dirichletovy. Tato okrajová podmínka byla použita při výpočtu homogenních stěn symetricky zatížených skokovou změnou povrchové teploty.

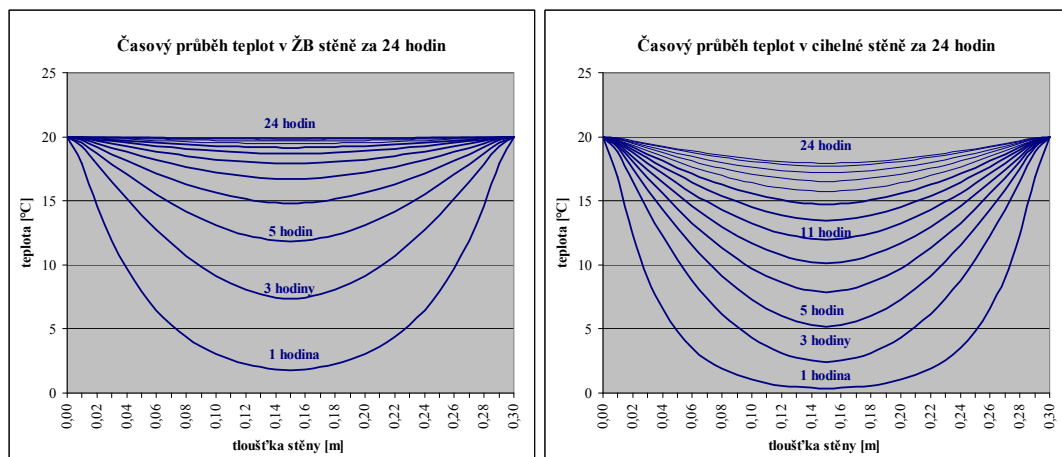
V tabulce 1 jsou popsány materiálové charakteristiky posuzovaných stavebních materiálů homogenní stěny. Byly srovnávány klasické stavební materiály – železobeton, děrovaná cihla a lehké izolační materiály používané v dřevostavbách – minerální vlákno, dřevovláknó.

Tab. 1: Materiálové charakteristiky vybraných stavebních materiálů

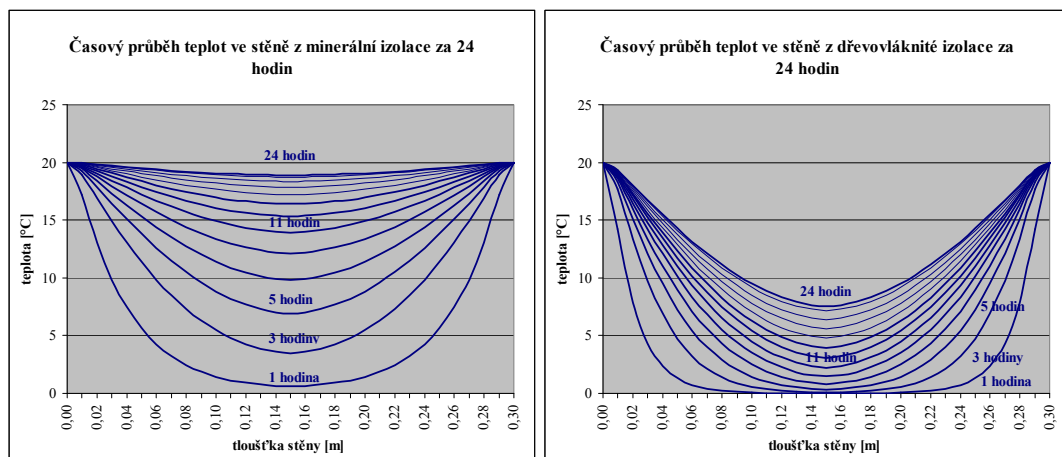
Stavební materiál	Materiálové charakteristiky			
	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Součinitel tepelné vodivosti	Součinitel teplotní vodivosti
	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/(kg K)]	$\lambda$ [W/(m K)]	$a$ [m <sup>2</sup> /s]
železobeton	2400	1020	1,58	$6,45 \cdot 10^{-7}$
děrovaná cihla (zdivo)	964	1000	0,27	$2,8 \cdot 10^{-7}$
minerální vlákno	135	840	0,045	$3,97 \cdot 10^{-7}$
dřevovláknó	250	2100	0,048	$0,91 \cdot 10^{-7}$

Porovnáním parametru součinitele teplotní vodivosti jednotlivých materiálů je zřejmé, že nejrychlejší průběh změny teploty uvnitř materiálu vykazuje železobeton a nejpomalejší průběh vykazuje dřevovláknó.

Výsledky dynamického simulačního výpočtu časových průběhů teplot ve stěně symetricky zatížené skokovou změnou povrchové teploty při použití různých variant materiálů [10] jsou graficky znázorněny na obr. 1 a 2.



Obr. 1: Časový průběh teplot ve stěně z železobetonu a stěně z děrovaných cihel



Obr. 2: Časový průběh teplot ve stěně z minerální izolace a stěně z dřevovláknité izolace

Z uvedených obrázků je zřejmé, že nejrychleji se zahřívá železobetonová stěna a nejpomaleji dřevovláknito. Při porovnání časového průběhu teplot uvnitř stěn z minerální izolace a dřevovláknité izolace (obr. 2), je vidět zřetelně pomalejší nárůst teploty uvnitř stěny z dřevovláknita. Tento jev je ovlivněn vysokou měrnou tepelnou kapacitou tohoto materiálu, která je až 2,5 násobně vyšší než u minerálního vlákna.

### 3 DYNAMICKÝ SIMULAČNÍ VÝPOČET TEPELNÉ ZÁTĚŽE OBVODOVÉ STĚNY DŘEVOSTAVBY V LETNÍM OBDOBÍ

Dynamické tepelné chování obvodové konstrukce v letním období ovlivňuje nejen její materiálová skladba, ale i klimatické vlivy působící na vnější povrch konstrukce. Mezi tyto vlivy, které tvoří okrajové podmínky výpočtu, patří:

- sluneční ozáření  $G$  [ $\text{W/m}^2$ ] - přímý plošný zdroj tepla, který ovlivňuje hustotu tepelného toku pohlceného vnějším povrchem konstrukce,
- teplota venkovního vzduchu  $\theta_e$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] - vyjádřena pomocí denního průběhu kolísání teploty venkovního vzduchu, která ovlivňuje hustotu konvektivního tepelného toku mezi povrchem konstrukce a obklopujícím vzduchem,
- obloha  $\theta_{\text{sky}}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – vyjádřena ekvivalentní teplotou, která ovlivňuje hustotu sálavého tepelného toku mezi vnějším povrchem konstrukce a oblohou,
- okolní povrchy (terén)  $\theta_g$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] – vyjádřena ekvivalentní teplotou, která ovlivňuje hustotu sálavého tepelného toku mezi vnějším povrchem konstrukce a okolním terénem.

V tomto příspěvku je proveden simulační výpočet dynamického tepelného chování obvodové stěny dřevostavby v letním období. K výpočtu byl použit software CalA [7].

#### 3.1 Materiálová skladba konstrukce

V tabulce 2 je uvedena skladba posuzované obvodové konstrukce dřevostavby. Orientace stěny je na jižní stranu.

Simulační výpočet byl pro srovnání proveden pro dvě materiálové varianty obvodové konstrukce:

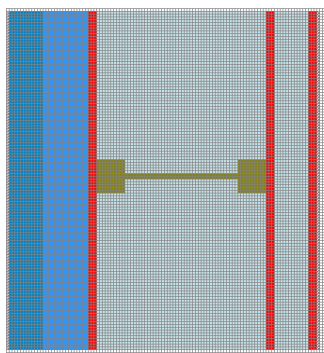
1. s použitím dřevovláknité izolace,
2. s použitím minerálně vláknité izolace.

Tab. 2: Skladba obvodové konstrukce v místě mezi nosnými sloupky pro dvě materiálové varianty tepelné izolace

Skladba konstrukce pro dvě materiálové varianty tepelné izolace	Materiálové charakteristiky			
	Tloušťka vrstvy	Objemová hmotnost	Měrná tepelná kapacita	Součinitel tepelné vodivosti
	$d$ [m]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$c$ [J/(kg K)]	$\lambda$ [W/(m K)]
deska Fermacell	0,015	1000	1250	0,13
dřevovláknitá izolace Steico Flex/minerálně vlák. izolace	0,060	50/70	2100/840	0,039/0,035
deska Fermacel Vapor	0,015	1000	1250	0,13
dřevovláknitá izolace Steico Flex/ minerálně vlák. izolace	0,300	50/70	2100/840	0,039/0,035
deska Fermacell	0,015	1000	1250	0,13
dřevovláknitá izolace Steico Therm/ minerálně vlák. izolace	0,080	160/135	2100/840	0,039/0,045
dřevovláknitá izolace Steico Protect/ minerálně vlák. izolace	0,060	250/135	2100/840	0,048/0,045
omítka Baumit	0,007	1800	790	0,47

### 3.2 Tvorba geometrie řešeného detailu

Kresba řešeného detailu v programu CalA se provede do předem nastavené výpočetní sítě, která se nastaví buď pomocí počtu buněk v rastru (ve směru osy x a y) nebo rozměrů základní obdélníkové buňky výpočetního rastru. Velikost rastru se doporučuje volit tak, aby přesáhl kresbu vždy o 2 buňky ze všech stran. Na obrázku 3 je ukázka geometrie řešeného detailu obvodové stěny dřevostavby v uvedeném softwaru. Jednotlivé stavební materiály lze načíst buď přímo z výchozí databáze programu nebo je lze do ní doplnit. Pro každý materiál se zadávají tři základní materiálové charakteristiky – objemová hmotnost, měrná tepelná kapacita a součinitel tepelné vodivosti.



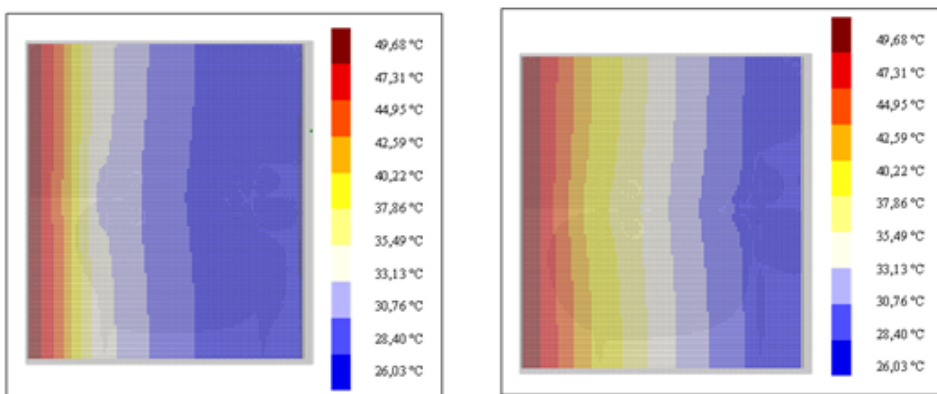
Obr. 3: Geometrie řešeného detailu v softwaru CalA

### 3.3 Okrajové podmínky výpočtu

Pro nestacionární výpočet šíření tepla konstrukcí je nutné nejdříve definovat počáteční okrajové podmínky, které vyjadřují rozložení teplot v konstrukci v čase  $t = 0$ . Dalším krokem výpočtu je nastavení nestacionárních okrajových podmínek, které zahrnují: volbu časového kroku, teploty venkovního a vnitřního vzduchu v Kelvinech, součinitele přestupu tepla na vnitřní a vnější straně konstrukce, zdroje tepla (vnitřní nebo vnější – např. solární radiace). Okrajové podmínky výpočtu pro řešený detail byly převzaty z normy [11] pro letní den 21. července. Vliv solární radiace byl ve výpočtu zahrnut do rovnocenné sluneční teploty vzduchu nahrazující v okrajových podmínkách teplotu venkovního vzduchu.

### 3.4 Výsledky nestacionárního výpočtu tepelné zátěže obvodové stěny

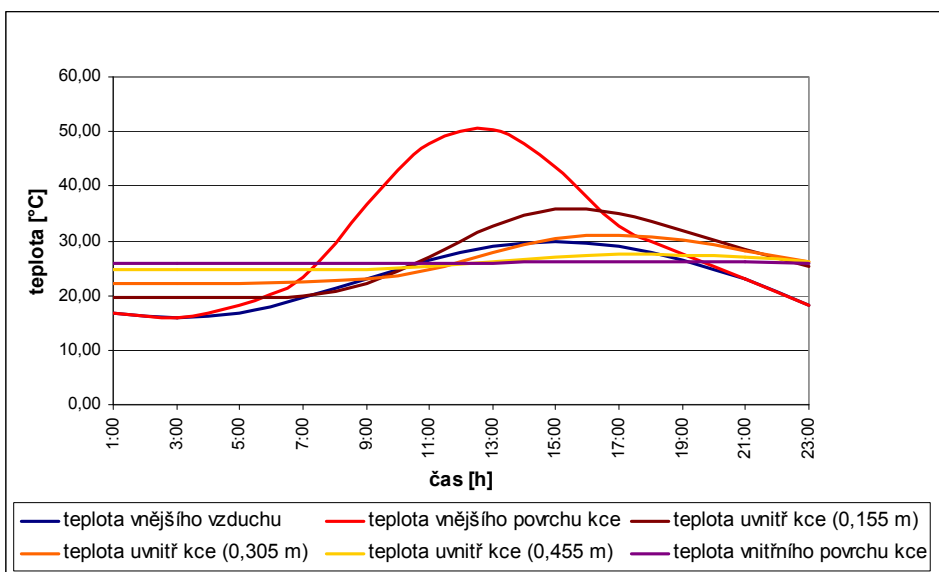
Výsledkem nestacionárního výpočtu je sada obrázků rastrové grafiky zobrazující teplotní pole v konstrukci v každém z počítačových časových kroků. Na obrázku 4 je ukázka výsledku simulačního výpočtu teplotního pole v konstrukci obvodové stěny dřevostavby v obou materiálových variantách ve 13 hodin dne 21.7, za podmínek nejvyšší rovnocenné sluneční teploty vzduchu.



Obr. 4: Simulační výpočet teplotního pole v konstrukci obvodové stěny ve 13 hodin dne 21.7. (pro normové okrajové podmínky)

Z průběhu rozložení teplot uvnitř konstrukce je patrné, že materiál s nižší měrnou tepelnou kapacitou (varianta 2 s minerálně vláknitou izolací) a vyšší teplotní vodivostí se prohřívá rychleji a přispívá k vyšší vnitřní povrchové teplotě konstrukce.

Na obrázku 5 je znázorněn časový průběh venkovních, povrchových a vnitřních teplot v konstrukci obvodové stěny dřevostavby s dřevovláknitou izolací za 24 hodin. Z obrázku je patrné, že výrazné kolísání vnější povrchové teploty konstrukce v průběhu dne se na vnitřní povrchové teplotě projeví pouze minimálně.



Obr. 5: Simulační výpočet časového průběhu teplot v konstrukci obvodové stěny dne 21.7.

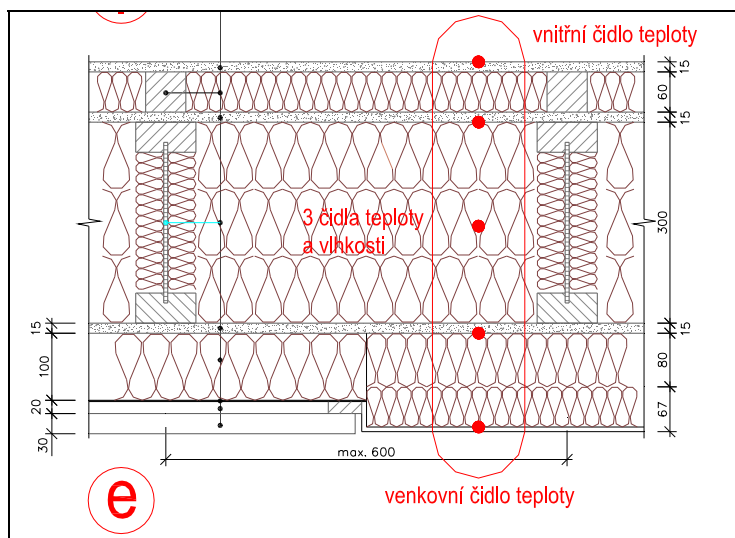
#### 4 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ ČASOVÉHO PRŮBĚHU TEPLOT V OBVODOVÉ STĚNĚ DŘEVOSTAVBY V LETNÍM OBDOBÍ

Simulační dynamické výpočty tepelné zátěže obvodové konstrukce byly porovnány s výsledky experimentálního měření teplot na reálné konstrukci obvodového stěny dřevostavby (obr. 6).



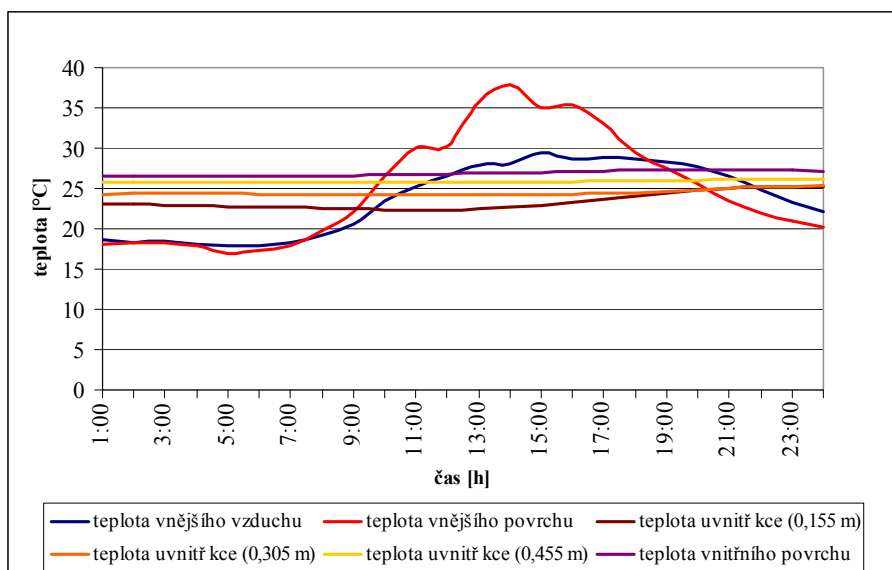
Obr. 6: Výzkumné a inovační centrum MSDK v pasivním standardu

Skladba konstrukce obvodové stěny odpovídá skladbě (varianta 1) uvedené v tabulce 2. Již v průběhu výroby dřevěných dílců obvodové stěny dřevostavby, byly do konstrukce zabudovány teplotní čidla. Umístění teplotních čidel v řezu obvodové stěny je uvedeno na obr. 7. Naměřená data se ukládaly v 15 minutových intervalech.



Obr. 7: Umístění teplotních čidel v řezu obvodové stěny dřevostavby [zdroj RD Rýmařov]

Z naměřených teplot pro vybraný slunečný letní den v červenci byl sestaven časový průběh teplot v konstrukci obvodové stěny, který je uveden na obrázku 8.

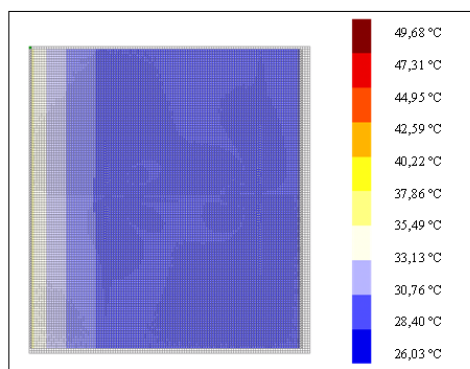


Obr. 8: Časový průběh naměřených teplot v konstrukci obvodové stěny

Průběh naměřených teplot v konstrukci potvrzuje výsledky simulačního výpočtu (viz Obr. 5) a dokazuje, že obvodová stěna svými tepelně technickými vlastnostmi dokáže zpomalit průchod tepla konstrukcí tak, aby nedocházelo k nadměrnému přehřívání vnitřního prostoru.

Na obrázku 9 je pro srovnání ukázka průběhu teplotního pole v konstrukci obvodové stěny s dřevovláknitou izolací, stanoveného dynamickým simulačním výpočtem, přičemž okrajové podmínky výpočtu byly dosazeny dle skutečně naměřených hodnot.





Obr. 9: Teplotní pole v konstrukci obvodové stěny ve 13 hodin dne 21.7.  
(pro okrajové podmínky získané experimentálním měřením)

## 5 ZÁVĚR

Porovnání dynamické tepelné odezvy různých stavebních materiálů prokázalo, že tepelně izolační materiály s vysokou měrnou tepelnou kapacitou a nízkou teplotní vodivostí jsou vhodným řešením pro eliminaci tepelné zátěže vnitřního prostředí staveb v letním období. Výsledky simulačního dynamického výpočtu i experimentálního měření potvrdili schopnost konstrukce s dřevovláknitou tepelnou izolací zpomalit prostup tepla a eliminovat vliv vysokého kolísání vnější povrchové teploty konstrukce na vnitřní povrchovou teplotu.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek byl realizován za finanční podpory Koncepčního rozvoje vědy a výzkumu Fakulty stavební VŠB-TU Ostrava v roce 2012, číslo IP 2292211 a dále za finanční podpory Evropského sociálního fondu a státního rozpočtu ČR v rámci projektu OPVK pod názvem: „Tvorba a internacionalizace špičkových vědeckých týmů a zvyšování jejich excelence na Fakultě stavební“, číslo projektu CZ.1.07/2.3.00/20.0013.

## LITERATURA

- [1] KALOUSEK, Miloš & David Bečkovský. Thermal comfort of lightweight building in summer time. In *Healthy buildings 2006*. Lisabon: TU Lisabon, 6.-8. 6. 2006, pp. 64–67. ISBN 80-214-3129- 6.
- [2] SVOBODA, Zdeněk & Marek KUBR Numerical simulation of heat transfer through hollow bricks in the vertical direction. *Journal of Building Physics*. 2011, v. 34, no. 4, pp. 325-350. ISSN 1744-2591. DOI:10.1177/1744259110388266.
- [3] LEFTHERIOTIS, George & Panayiotis YIANOULIS. Thermal properties of building materials evaluated by a dynamic simulation of a test cell. *Solar energy*. 2000, v. 69, no. 4, pp. 295-304. ISSN 0038-092X. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00102-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00102-X).
- [4] ALTERMAN, Dariusz et al. A concept for a potential metric to characterise the dynamic thermal performance of walls. *Energy and Buildings*. 2012, v. 54, pp. 52-60. ISSN 0378-7788. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.08.006>.
- [5] BARRIOS, Guillermo et al. Envelope wall/roof thermal performance parameters for non air-conditioned buildings. *Energy and Buildings*. 2012, v. 50, pp. 120–127. ISSN 0378-7788. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.030>.
- [6] ŠIKULA, Ondřej, Josef PLÁŠEK & Jiří HIRŠ. Numerical Simulation of the Effect of Heat Gains in the Heating Season. *Energy Procedia*. 2012, roč. 2012, č. 14, s. 906-912. ISSN: 1876 - 6102.

- [7] HALAHYJA, Martin, Ivan CHMÚRNY a Zuzana STERNOVÁ. *Stavebná tepelná technika: tepelná ochrana budov*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 1998, 253 s. ISBN 80-889-0504-4.
- [8] ŠIKULA, Ondřej. *Manuál k softwaru Cala*. 1. vyd. Brno: Tribun EU, 2009, 43 s. ISBN 978 - 80-7399-879-0.
- [9] ŠIKULA, Ondřej. Simulace provozních režimů otopných systémů s velkou akumulací. In *Konference Vytápění Třeboň 2011*. Praha: Společnost pro techniku prostředí, 2011. s. 223-228. ISBN 978-80-02-02291-6.
- [10] STANĚK, Kamil. *Tepelá dynamika a tepelné zatížení konstrukcí* [online]. Poslední revize 23.2. 2011 [cit. 20.10. 2012]. Dostupné z:   
< [http://kps.fsv.cvut.cz/file\\_download.php?fid=1984](http://kps.fsv.cvut.cz/file_download.php?fid=1984) >.
- [11] ČSN 73 0548 *Výpočet tepelné zátěže klimatizovaných prostorů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1986. 30 s.
- [12] LOMAS, Kevin et al. Bloomfield Empirical validation of building energy simulation programs *Energy and Buildings*. 1997, v. 26, no. 3, pp. 253–275. ISSN 0378-7788. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00007-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00007-8).

**Oponentní posudek vypracoval:**

Doc. Ing. Ondřej Šikula, Ph.D., Ústav technických zařízení budov, Fakulta stavební, VUT v Brně.

Doc. Ing. Miloš Kalousek, Ph.D., Ústav pozemního stavitelství, Fakulta stavební, VUT v Brně.